On propose ici quelques considérations élémentaires d'électricité atmosphérique. La résolution de cet exercice ne requiert pas de connaissances particulières, hormis les notions de force et d'énergie électrostatiques exigées par le programme. Toutes les grandeurs électriques dont il est question dans cet exercice sont supposées indépendantes du temps. Les charges électriques, de valeurs constantes, sont considérées ponctuelles.

13. On assimile la Terre à une boule solide de rayon $R_T \approx 6000$ km et de centre T. On suppose qu'elle porte une charge électrique $Q \approx -500$ kC ponctuelle, localisée en T. On s'intéresse à la valeur E_T, au niveau du sol, du champ électrique dû à cette charge. Pour cela, on précise que, si une charge électrique Q exerce une force électrostatique de valeur F_e sur une autre charge électrique q, alors cette dernière est soumise à un champ électrique de valeur $E_e = \frac{F_e}{|q|}$. Exprimer E_T puis calculer sa valeur. On donne $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \times 10^9$ SI (SI = Système International des unités), où ϵ_0 est la permittivité diélectrique du vide. A) $E_T = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon_0 R_T^2}$ B) $E_T = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon_0 R_T}$ C) $E_T = 1\ \mathrm{GV.m^{-1}}$ D) $E_T = 125\ \mathrm{V.m^{-1}}$
14. À l'instar du champ de pesanteur, le champ électrique au voisinage du sol peut être considéré localement uniforme (sa valeur ne dépend pas de l'altitude), de direction verticale et orienté vers le bas (verticale descendante). Près du sol, l'atmosphère contient très majoritairement des ions de charge électrique $q > 0$. Quel est, dans le référentiel terrestre, le vecteur accélération $\vec{a}$ d'un ion de masse m, dont le poids est négligeable, placé dans le champ électrique de valeur E_T ? Parmi les réponses proposées, $\vec{e_z}$ est le vecteur unitaire orienté vers le haut (sens de la verticale ascendante).
    A) $\vec{a} = -\frac{qE_T}{m}\vec{e_z}$ B) $\vec{a} = \frac{qE_T}{m}\vec{e_z}$ C) $\vec{a} = \vec{0}$ D) $\vec{a} = -\frac{mE_T}{q}\vec{e_z}$
15. Le mouvement vertical des ions positifs précédents définit un courant électrique. La valeur moyenne de ce courant est de 2×10^{-12} A par mètre carré de surface terrestre. En considérant la totalité de la surface terrestre, quel est l'ordre de grandeur de la durée Δt au bout de laquelle la charge positive transportée par ce courant est égale à $|Q|$?
    A) $\Delta t \approx 10$ s B) $\Delta t \approx 10$ min C) $\Delta t \approx 100$ min D) $\Delta t \approx 10$ h
16. Les résultats précédents indiquent que la charge électrique de la Terre serait complètement neutralisée en peu de temps s'il n'existait pas un mécanisme de recharge. Ce sont les orages qui, en jouant le rôle de batterie électrique, permettent de maintenir une valeur de Q quasi constante. On se propose de déterminer quelques ordres de grandeurs caractéristiques qui interviennent dans un nuage d'orage. Pour cela, on peut modéliser grossièrement un tel nuage par un ensemble de deux charges ponctuelles, disposées verticalement, l'une négative $Q_n \approx -40$ C proche de la base du nuage et l'autre positive $Q_p \approx 40$ C à plus haute altitude. Sachant que ces deux charges sont distantes de $d = 5$ km, exprimer le vecteur force électrostatique $\vec{F_e}$ qu'exerce la charge négative Q_n sur la charge positive Q_p, puis calculer sa norme F_e. Parmi les réponses proposées, $\vec{e_z}$ est le vecteur unitaire orienté vers le haut (sens de la verticale ascendante), z_n la coordonnée verticale de la charge Q_n et z_p celle de la charge Q_p.
    A) $\vec{F_e} = \frac{Q_nQ_p}{4\pi\epsilon_0(z_p-z_n)^2}\vec{e_z}$
    B) $\vec{F_e} = \frac{Q_nQ_p}{4\pi\epsilon_0(z_p-z_n)}\vec{e_z}$
    C) $F_e \approx 6 \times 10^2$ N
    D) $F_e \approx 6 \times 10^5$ N
17. Quelle est l'expression de l'énergie potentielle $\varepsilon_{p,e}$ de la charge Q_p soumise à la force électrostatique de la part de la charge Q_n ? On prendra comme origine des énergies potentielles la configuration où les charges sont à des distances mutuelles infinies. Sachant que la production annuelle moyenne de puissance électrique en France était, en 2016, d'environ 150 GW (données officielles d'EDF), que vaut le rapport $\alpha = \frac{\varepsilon_{p,e}}{\varepsilon_{EDF}}$ entre la valeur de $\varepsilon_{p,e}$ et la valeur de l'énergie ε_{EDF} produite en une seconde sur le réseau électrique français.
    A) $\varepsilon_{p,e} = \frac{Q_nQ_p}{4\pi\epsilon_0 d}$ B) $\varepsilon_{p,e} = \frac{Q_p}{4\pi\epsilon_0 d}$ C) $\alpha \approx 0{,}02$ D) $\alpha \approx 0{,}2$
18. Le nuage d'orage précédent présente une tension électrique U entre la base et son sommet que l'on peut écrire $U = \frac{2\varepsilon_{p,e}}{|Q_n|}$. Calculer U numériquement. En outre, sachant que la valeur E_o du champ électrique correspondant peut être prise égale à $\frac{F_e}{|Q_n|}$, quel est le rapport $\alpha_E = \frac{E_o}{E_T}$ entre E_o et la valeur E_T du champ obtenu à la question 13 ?
    A) $U \approx 1{,}5$ MV B) $U \approx 150$ MV C) $\alpha_E \approx 120$ D) $\alpha_E \approx 0{,}1$

On propose ici quelques considérations élémentaires d'électricité atmosphérique. La résolution de cet exercice ne requiert pas de connaissances particulières, hormis les notions de force et d'énergie électrostatiques exigées par le programme. Toutes les grandeurs électriques dont il est question dans cet exercice sont supposées indépendantes du temps. Les charges électriques, de valeurs constantes, sont considérées ponctuelles.

13. On assimile la Terre à une boule solide de rayon $R_T \approx 6000$ km et de centre T. On suppose qu'elle porte une charge électrique $Q \approx -500$ kC ponctuelle, localisée en T. On s'intéresse à la valeur E_T, au niveau du sol, du champ électrique dû à cette charge. Pour cela, on précise que, si une charge électrique Q exerce une force électrostatique de valeur F_e sur une autre charge électrique q, alors cette dernière est soumise à un champ électrique de valeur $E_e = \frac{F_e}{|q|}$. Exprimer E_T puis calculer sa valeur. On donne $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \times 10^9$ SI (SI = Système International des unités), où ϵ_0 est la permittivité diélectrique du vide. A) $E_T = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon_0 R_T^2}$ B) $E_T = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon_0 R_T}$ C) $E_T = 1\ \mathrm{GV.m^{-1}}$ D) $E_T = 125\ \mathrm{V.m^{-1}}$
14. À l'instar du champ de pesanteur, le champ électrique au voisinage du sol peut être considéré localement uniforme (sa valeur ne dépend pas de l'altitude), de direction verticale et orienté vers le bas (verticale descendante). Près du sol, l'atmosphère contient très majoritairement des ions de charge électrique $q > 0$. Quel est, dans le référentiel terrestre, le vecteur accélération $\vec{a}$ d'un ion de masse m, dont le poids est négligeable, placé dans le champ électrique de valeur E_T ? Parmi les réponses proposées, $\vec{e_z}$ est le vecteur unitaire orienté vers le haut (sens de la verticale ascendante).
    A) $\vec{a} = -\frac{qE_T}{m}\vec{e_z}$ B) $\vec{a} = \frac{qE_T}{m}\vec{e_z}$ C) $\vec{a} = \vec{0}$ D) $\vec{a} = -\frac{mE_T}{q}\vec{e_z}$
15. Le mouvement vertical des ions positifs précédents définit un courant électrique. La valeur moyenne de ce courant est de 2×10^{-12} A par mètre carré de surface terrestre. En considérant la totalité de la surface terrestre, quel est l'ordre de grandeur de la durée Δt au bout de laquelle la charge positive transportée par ce courant est égale à $|Q|$?
    A) $\Delta t \approx 10$ s B) $\Delta t \approx 10$ min C) $\Delta t \approx 100$ min D) $\Delta t \approx 10$ h
16. Les résultats précédents indiquent que la charge électrique de la Terre serait complètement neutralisée en peu de temps s'il n'existait pas un mécanisme de recharge. Ce sont les orages qui, en jouant le rôle de batterie électrique, permettent de maintenir une valeur de Q quasi constante. On se propose de déterminer quelques ordres de grandeurs caractéristiques qui interviennent dans un nuage d'orage. Pour cela, on peut modéliser grossièrement un tel nuage par un ensemble de deux charges ponctuelles, disposées verticalement, l'une négative $Q_n \approx -40$ C proche de la base du nuage et l'autre positive $Q_p \approx 40$ C à plus haute altitude. Sachant que ces deux charges sont distantes de $d = 5$ km, exprimer le vecteur force électrostatique $\vec{F_e}$ qu'exerce la charge négative Q_n sur la charge positive Q_p, puis calculer sa norme F_e. Parmi les réponses proposées, $\vec{e_z}$ est le vecteur unitaire orienté vers le haut (sens de la verticale ascendante), z_n la coordonnée verticale de la charge Q_n et z_p celle de la charge Q_p.
    A) $\vec{F_e} = \frac{Q_nQ_p}{4\pi\epsilon_0(z_p-z_n)^2}\vec{e_z}$
    B) $\vec{F_e} = \frac{Q_nQ_p}{4\pi\epsilon_0(z_p-z_n)}\vec{e_z}$
    C) $F_e \approx 6 \times 10^2$ N
    D) $F_e \approx 6 \times 10^5$ N
17. Quelle est l'expression de l'énergie potentielle $\varepsilon_{p,e}$ de la charge Q_p soumise à la force électrostatique de la part de la charge Q_n ? On prendra comme origine des énergies potentielles la configuration où les charges sont à des distances mutuelles infinies. Sachant que la production annuelle moyenne de puissance électrique en France était, en 2016, d'environ 150 GW (données officielles d'EDF), que vaut le rapport $\alpha = \frac{\varepsilon_{p,e}}{\varepsilon_{EDF}}$ entre la valeur de $\varepsilon_{p,e}$ et la valeur de l'énergie ε_{EDF} produite en une seconde sur le réseau électrique français.
    A) $\varepsilon_{p,e} = \frac{Q_nQ_p}{4\pi\epsilon_0 d}$ B) $\varepsilon_{p,e} = \frac{Q_p}{4\pi\epsilon_0 d}$ C) $\alpha \approx 0{,}02$ D) $\alpha \approx 0{,}2$
18. Le nuage d'orage précédent présente une tension électrique U entre la base et son sommet que l'on peut écrire $U = \frac{2\varepsilon_{p,e}}{|Q_n|}$. Calculer U numériquement. En outre, sachant que la valeur E_o du champ électrique correspondant peut être prise égale à $\frac{F_e}{|Q_n|}$, quel est le rapport $\alpha_E = \frac{E_o}{E_T}$ entre E_o et la valeur E_T du champ obtenu à la question 13 ?
    A) $U \approx 1{,}5$ MV B) $U \approx 150$ MV C) $\alpha_E \approx 120$ D) $\alpha_E \approx 0{,}1$

Correction.

13. Connaissant la force électrostatique de norme $F_e = \frac{|Q||q|}{4\pi\epsilon_0 R_T^2}$ on en déduit l'expression du champ $E_T = \frac{F_e}{|q|} = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon_0 R_T^2}$ puis sa valeur numérique $9.10^9 \frac{500.10^3}{(6000.10^3)^2} = \frac{9.10^9 \times 5.10^5}{(6.10^6)^2} = \frac{45.10^{14}}{36.10^{12}} \approx \frac{9\times 5}{7\times 5}.10^2 \approx 1{,}25.10^2 = 125\ \mathrm{V.m^{-1}}$ d'où les **réponses A) et D)**.
14. La force $\overrightarrow{F_e} = q\overrightarrow{E_T}$ exercée sur l'ion est orientée vers le sol puisque la Terre est assimilée à une charge négative et l'ion est positif, on a ainsi $\overrightarrow{F_e} = -qE_T\overrightarrow{e_z}$. Le principe fondamental de la dynamique implique donc une accélération s'écrivant $\vec{a} = \frac{\overrightarrow{F_e}}{m} = -\frac{qE_T}{m}\overrightarrow{e_z}$: c'est la **réponse A)** qui est juste.
15. En appelant $j = 2.10^{-12}\ \mathrm{A.m^{-2}}$ le courant par unité de surface, la définition de l'intensité du courant électrique nous donne $\Delta t = \frac{|Q|}{I} = \frac{|Q|}{j\times 4\pi R_T^2} = \frac{5.10^5}{2.10^{-12}\times 4\times 3{,}14\times 36.10^{12}} \approx \frac{5.10^5}{8\times 3{,}14\times 36} \approx \frac{50.10^4}{25\times 36} \approx \frac{20\,000}{36} \approx \frac{5000}{9}$ soit un peu plus de 500 s donc une dizaine de minutes : **réponse B)**.
16. Tout comme la force gravitationnelle, la force électrostatique est inversement proportionnelle au carré de la distance, donc $F_e = \frac{|Q_n Q_p|}{4\pi\epsilon_0 (z_p - z_n)^2} \approx 9.10^9 \times \frac{40^2}{(5.10^3)^2} = \frac{9.10^9 \times 16.10^2}{25.10^6} = \frac{144}{25}.10^5 \approx 6.10^5\ \mathrm{N}$ d'où les **réponses A) et D)**.
17. On cherche $\varepsilon_{p,e}$ telle que $\overrightarrow{F_e} = -\overrightarrow{\mathrm{grad}}(\varepsilon_{p,e}) = -\frac{\partial \varepsilon_{p,e}}{\partial r}\overrightarrow{e_r}$ en coordonnées sphériques (mais ici r est noté d la distance entre les deux charges et $\overrightarrow{e_r} = \overrightarrow{e_z}$). En primitivant on a $\varepsilon_{p,e} = \frac{Q_n Q_p}{4\pi\epsilon_0 d} + K$ une constante, et avec la référence prise à l'infini, c'est-à-dire que $\lim_{d\to\infty} \varepsilon_{p,e} = 0$, on obtient finalement $K = 0$ et $\varepsilon_{p,e} = \frac{Q_n Q_p}{4\pi\epsilon_0 d} = 9.10^9 \frac{1{,}6.10^3}{5.10^3} \approx 3.10^9\mathrm{J}$; on en déduit la valeur numérique de $\alpha \approx \frac{3.10^9}{150.10^9} = \frac{3}{3\times 50} = 0{,}02$: les réponses A) et C) sont donc celles attendues, même si on remarque un problème de signe : comme $Q_n < 0$ on a $\varepsilon_{p,e} < 0$ également et on se doute que le coefficient demandé était $\alpha = \left|\frac{\varepsilon_{p,e}}{\varepsilon_{EDF}}\right|$.
18. De même on se doute que $U = \left|\frac{2\varepsilon_{p,e}}{Q_n}\right| \approx \frac{2\times 3.10^9}{40} = \frac{30.10^8}{20} = 1{,}5.10^8 = 150\ \mathrm{MV}$; on a également $E_o = \frac{6.10^5}{40} = 1{,}5.10^4\ \mathrm{V.m^{-1}}$ et finalement $\alpha_E \approx \frac{1{,}5.10^4}{1{,}25.10^2} \approx 120$ d'où les **réponses B) et C)**.